



TITLE:

岩盤空洞の気密性評価のための応力浸透流連成解析手法の適用性に関する研究( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

黒瀬, 浩公

---

CITATION:

黒瀬, 浩公. 岩盤空洞の気密性評価のための応力浸透流連成解析手法の適用性に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12926>

RIGHT:

|   |                                     |    |       |
|---|-------------------------------------|----|-------|
| 京都大学  | 博士（工学）                              | 氏名 | 黒瀬 浩公 |
| 論文題目  | 岩盤空洞の気密性評価のための応力浸透流連成解析手法の適用性に関する研究 |    |       |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本研究は、高圧ガスの地下岩盤貯槽という国内初のプロジェクトに対し、岩盤貯槽の気密性評価手法の高度化を目的に実施したものである。多くの亀裂を有する岩盤の気密性を評価するために、毛細管抵抗圧を導入した応力浸透流連成解析手法を開発し、ボーリング孔を利用した透気試験、小規模岩盤空洞気密試験の解析を行い、その適用性について実証した。さらに、波方基地で実施された実空洞の気密試験に適用し、貯槽の気密性を確認するとともに、水封システム設計基準が十分に満足されていることを示した。本論文は7章からなり、その要点は以下のとおりである。</p> <p>第1章では、本研究の目的と構成について示した。</p> <p>第2章では、岩盤貯槽の設計で現在用いられている Aberg によるベルヌーイの定理を適用して水理学的検討により導かれている方法について述べ、岩盤内亀裂の毛細管抵抗圧を考慮することにより、より合理的な設計の可能性があることを示した。次に、岩盤の気密性に関する既往の研究結果より、Aberg による漏気防止条件と駒田、中川らによる模型実験およびボーリング透気試験結果に基づく気密条件の整理を行った。実験的検討結果によると、漏気が発生する時の鉛直動水勾配は <math>I_0 &gt; 0 \sim 0.5</math> であり、Aberg による鉛直動水勾配 <math>I_0 &gt; 1</math> とした設計や、波方基地、倉敷基地で気密性確保の条件として採用した鉛直動水勾配 <math>I_0 &gt; 0.5</math> が合理的な設計基準であることを示した。</p> <p>第3章では、本論文において研究対象とした、波方国家石油ガス備蓄基地および倉敷国家石油ガス備蓄基地の概要を説明した。さらに貯槽掘削時に得られた地下水観測ボーリング孔、水封ボーリング孔、間隙水圧設置孔、貯槽グラウト外リング1次孔などで試験したルジオン値を用い、これらを地質分帯、断層およびマイクロフラクチャ領域ごとにクリギングして透水性の空間的分布推定を行い、水理・地質構造モデルを構築した。本手法により構築した水理・地質構造モデルは、貯槽掘削から気密試験に至るまでの地下水挙動、貯槽湧水量および水封水供給量を精度よく再現できることを確認した。</p> <p>第4章では、本研究で用いる応力浸透流連成解析の基礎となる粒状体個別要素法（DEM）と Channel-Domain ネットワーク解析手法とのハイブリッド解析による応力浸透流連成解析手法の概要について述べ、次に、岩盤の亀裂の性状を考慮した毛細管抵抗圧の定式化について示した。さらに提案した応力浸透流連成解析を用いて、岩盤の割れ目性状（開口幅、割れ目密度）についてパラメータスタディを実施し、解析パラメータの設定方法および岩盤の気密性限界について検討を行った。これらの検討結果より、岩盤の透水・透気特性、および毛細管抵抗圧が、岩盤の割れ目性状によって異なることを理論的に明らかにした。</p> |                                     |    |       |

|  |        |    |       |
|--|--------|----|-------|
| 京都大学   | 博士（工学） | 氏名 | 黒瀬 浩公 |
| <p>第5章では、波方基地において実施したボーリング孔を利用した透気試験結果より、試験区間の気室圧が周辺水圧より高い場合は気密性が保たれること、倉敷基地における試験結果より、グラウト改良前、及び改良後のいずれ試験においても、試験区間の気室圧力が周辺間隙水圧よりも小さい場合、すなわち、試験区間孔壁の動水勾配の方向が周辺岩盤から試験区間に向かう方向に正であれば（<math>I &gt; 0</math>），漏気は発生せずに気密性が保たれることを確認した。</p> <p>次に、倉敷基地における定水位試験を対象に本手法を適用し、試験において漏気を確認された圧力やボーリング孔周辺の間隙水圧挙動が精度よく再現できることを確認した。また波方基地において、立地調査時に掘削された調査横坑を利用して実施した小規模岩盤空洞気密試験について岩盤空洞の気密性を評価した。空洞内圧が空洞周辺間隙水圧よりも小さい場合には漏気が発生しないこと、漏気発生時には、ガスフロントが岩盤内の亀裂に侵入することにより漏気箇所の間隙水圧に不安定な挙動が計測され、同時にその箇所でAEが発生することを確認した。本手法を用いて小規模岩盤空洞気密試験の再現解析を行った結果は、試験で得られた漏気の発生時期、発生箇所および周辺間隙圧挙動が試験結果と概ね一致することを確認した。</p> <p>第6章では、実貯槽における貯槽の完成試験として実施される岩盤貯槽気密試験について、試験方法および気密性評価方法について述べた。気密性判定指標は、貯槽内空気の物質収支と理想気体の状態方程式より、圧力変動量として定式化した。倉敷基地において実施された気密試験において同指標を適用した結果、圧力変動量は<math>-0.002\text{kPa}</math>となり気密性判定基準<math>\pm 0.5\text{kPa}</math>以内に十分に収まった。また、水封システム内の間隙水圧のうち、貯槽との水頭差が最も低い計器の水頭差は12mで、貯槽との間の平均動水勾配（貯槽と間隙水圧の離間距離は12m）は1.0となり、設計動水勾配0.5以上を満足した。貯槽内圧力挙動から得られた気密性評価と併せて、貯槽の高い気密性を確認した。次に、波方基地において実施された気密試験結果に対して本手法を適用し、試験結果と同様に岩盤貯槽の気密性を確認するとともに、貯槽周辺の地下水挙動から、水封システム設計基準が充分満足されていることを確認した。</p> <p>第7章では、本研究で得られた知見をまとめて結論とした。本研究では、各種試験データ（原位置岩盤試験、地質調査、BTVによる壁面観察、コア観察、原位置水理試験）に基づき、地球統計学手法による水理・地質構造の構築、岩盤の割れ目を考慮した応力浸透流連成解析による気密性評価という統合的な気密性評価スキームを構築した。本評価スキームにより、漏気発生の有無、漏気発生箇所および周辺間隙水圧挙動の評価が可能となった。これらをボーリング孔での透気試験、小規模岩盤気密試験および実貯槽の気密試験へ適用し、気密性評価に有効な手法であることを明らかにした。</p> |        |    |       |

## (論文審査の結果の要旨)

炭化水素資源の多くを輸入に頼っている我が国では、民間備蓄に加え国家備蓄を行っている。このうち LPG に関しては、岡山県倉敷基地および愛媛県波方基地において、石油天然ガス・金属鉱物資源機構が国から委託を受けて、水封式地下岩盤貯槽方式により LPG の備蓄を行っている。これらの基地では、地下約 150m の深度の岩盤中に空洞を掘削し、LPG 備蓄のための貯槽が作られた。本研究はこの水封式貯槽の建設に必須の技術である岩盤空洞の気密性を評価する目的で、応力浸透流連成解析手法を開発し、これら 2 カ所の LPG 備蓄基地に対して適用し、以下の 5 種類の課題に対してその有効性を示した。

1. LPG の岩盤貯槽においては、空洞内ガスが地表への漏洩を防ぐために水封方式が広く採用されている。この手法においては岩盤空洞内のガスが、岩盤内の亀裂に沿って流動を生じると、空洞中のガスが漏洩する。このため漏洩が生じない条件を検討し、Aberg (1977) の導出した条件よりも広い条件においても、ガスの漏洩が無いことを文献と事例検討によって明らかとし、その閾値を定めた。

2. 岩盤空洞掘削時に取得された地質データと、水理データ（ルジオン値）を元に、地球統計学の手法であるクリギング法を用いて倉敷基地、波方基地の 3 次元地質構造モデルを作成し、両地域での水理構造を明らかにした。

3. 一般に空洞内にガスなどの流体を圧入すると、それに応じて力学的平衡が破れ、応力のバランスが崩れる。これにより、岩盤中の孔隙や亀裂内の流体が移動し、同時に作用している応力に応じて亀裂の開口幅が変化する。この問題を精密に評価するために、粒状体個別要素法と、チャネルードメイン法を連成する手法を提案しアルゴリズムの開発を行った。

4. 本研究で開発された応力浸透流連成解析法を、波方基地において掘削された模擬空洞に適用し、岩盤気密試験結果の解析を行った。その結果開発したシミュレータは試験結果の圧力変動を充分精度良く再現していることが示せた。

5. さらに倉敷基地、波方基地において LPG 貯槽用に掘削された巨大空洞に対して、開発したシミュレータを適用し、水封システム設計基準が充分満足されていることを示した。

このように本研究において、岩盤空洞の気密性の評価に必要な流体に作用している応力と、その結果として亀裂開口幅の変化の関係をシミュレート可能な方法を開発し、国内 2 カ所の LPG 貯槽基地に対して適用し、気密性の評価を行った。以上、本研究は、岩盤空洞の気密性評価を行うに当たって広い応用が期待され、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 2 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。